

---

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

Faculty of Electrical Engineering and Communication  
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**Operační zesilovač CMOS pracující v rozsahu napájecích napětí**

BAKALÁRSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

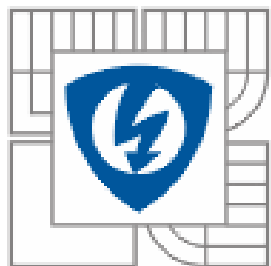
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

VLADIMÍR BUČEK

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Faculty OF Electrical Engineering and Communication  
DEPARTMENT of Microelectronics

# OPERAČNÍ ZESILOVAČ CMOS PRACUJÍCÍ V ROZSAHU NAPÁJECÍCH NAPĚTÍ

RAIL-TO-RAIL CMOS OPERATIONAL AMPLIFIER

BAKALÁRSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

VLADIMÍR BUČEK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Prof. Ing. VLADISLAV MUSIL, CSc.

BRNO 2008

---

# Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Vladimír Buček

Bytem:

Narozen/a (datum a místo): 8.5.1985, Brno

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

Ing. Zdenka Rozsivalová

(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
  - ☐ diplomová práce
  - ☒ bakalářská práce
  - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Operační zesilovač CMOS pracující v rozsahu napájecích napětí

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

Ústav: Ústav mikroelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě – počet exemplářů 1
- ☒ elektronické formě – počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30. 5. 2008

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

---

## Abstrakt:

Cílem této práce bylo seznámit se s návrhem operačního zesilovače technologií CMOS. Nejdříve byla analyzována struktura tranzistorů PMOS a NMOS, díky kterým jsme mohli postupně navrhovat jednotlivé bloky operačního zesilovače. Práce pojednává o návrhu diferenčního páru, proudových zrcadel a koncového stupně zesilovače. Po návrhu jednotlivých bloků byla provedena kontrola operačního zesilovače simulačním programem CADENCE.

## Abstract:

The object of this project was to get acquainted with proposal of operational amplifier of technology CMOS. Primarily was analyse the structure of transistors PMOS and NMOS, thanks to them we could gradually suggested single blocks of operational amplifier. The work treats about proposal of differential pair, current mirror and the ending stage of amplifier. After the proposal of single blocks was done control of operational amplifier by simulation programme CADENCE.

## Klíčová slova:

Operační zesilovač, CMOS, rail-to-rail

## Keywords:

Operational amplifier, CMOS, rail-to-rail

---

## Bibliografická citace díla:

BUČEK, V. *Operacni zesilovač CMOS pracující v rozsahu napájecích napětí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. XY s.  
Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

## Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. 5. 2008

.....

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Vladislavovi Musilovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

## Obsah

1	Úvod.....	8
2	Unipolární tranzistory .....	9
3	Technologie CMOS.....	12
4	Rail-to-rail .....	13
5	Korekční kapacitor .....	15
6	Frekvenční stabilita .....	16
7	Jednotlivé bloky první části operačního zesilovače .....	16
7.1	Diferenční zesilovač .....	16
7.2	Proudová zrcadla .....	17
7.2.1	MOS tranzistor jako dioda .....	18
7.2.2	Jednoduché proudové zrcadlo .....	18
7.2.3	Cascode current mirror – Kaskodové proudové zrcadlo .....	19
7.3	Zapojení 1. stupně zesilovače rail-to-rail .....	22
7.4	Zapojení 2. stupně zesilovače.....	24
8	Závěr.....	25
9	Použitá literatura .....	26
10	Příloha .....	27

---

## 1 Úvod

První operační zesilovače (OZ) byly určeny pro analogové počítače, kde prováděly matematické operace (sčítání, odčítání, násobení, dělení a další složitější funkce). Tyto OZ byly realizovány pomocí elektronek, takže byly velké, málo spolehlivé a měly velkou spotřebu energie. Přechod na polovodičové prvky umožnil velké snížení jejich rozměrů a výrobních a provozních nákladů a zároveň došlo k podstatnému vzrůstu spolehlivosti. Proto se OZ velmi rychle rozšířily. Vzniklo mnoho druhů zesilovačů podle různých používaných technologií. V posledních letech se začaly velmi rozmáhat zesilovače typu MOSFET pro jejich dobré vlastnosti a velmi malou spotřebu energie.

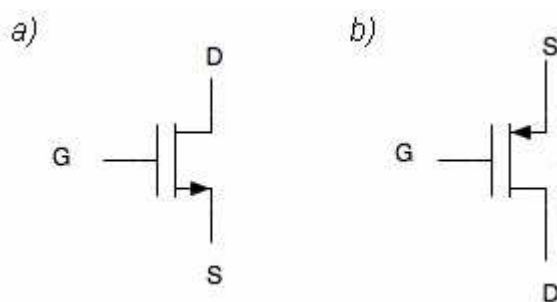
Pro návrh operačního zesilovače byly použity tranzistory typu PMOS a NMOS, které tvoří tři nejdůležitější bloky zesilovače a to jsou: diferenční pár, proudová zrcadla a druhý zesilující stupeň. Pro diferenční stupeň byl použit jeden pár tranzistorů NMOS a jeden pár tranzistorů PMOS, aby zesilovač pracoval v režimu od napětí k napětí, čili rail-to-rail. Jako proudová zrcadla se použili typy: jednoduché proudové zrcadlo pro přívod proudu do diferenčního páru a druhého zesilujícího stupně a dále kaskodové proudové zrcadlo, které se vyznačuje vysokým výstupním odporem. Pro druhý zesilující stupeň byl použit vstupní tranzistor NMOS.



## 2 Unipolární tranzistory

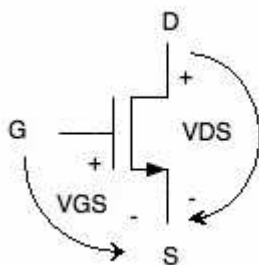
Jedná se o tranzistor, který je řízen polem. Zatímco u bipolárních tranzistorů protéká hlavní proud přes polovodičové materiály s dotací typu P a N, tak u unipolárních tranzistorů putují jen přes jeden typ dotace P nebo N. Jestliže je tranzistor dotován vodivostí N, tak jej nazýváme NMOS a jestliže má příměs dotace typu P, označujeme jej jako PMOS.

Většinou mají unipolární tranzistory tři vývody. Jejich zobrazení můžeme vidět na obr.1, kde je znázorněn jak tranzistor typu P tak i tranzistor typu N. Schematická značka a popis vývodů je podobný jako u bipolárních tranzistorů. Elektroda S – Source odpovídá emitoru, je definován také jako zdroj, dále elektroda G – Gate odpovídající bázi, pracuje jako brána a poslední vývod se označuje E – Emitter, je jako kolektor a značí odtok.



Obr. 1 Schematické značky typu a) NMOS, b) PMOS

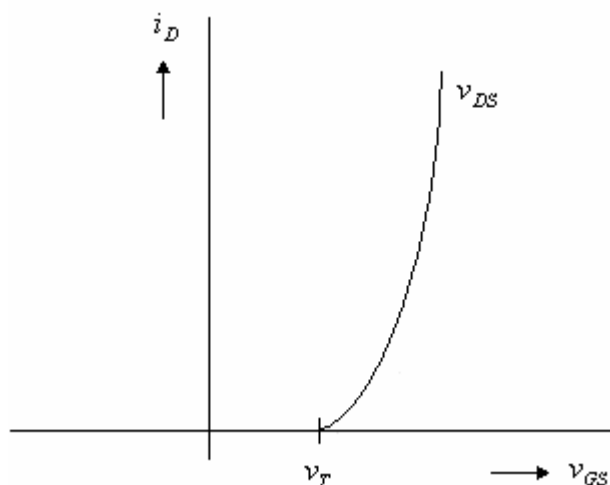
U těchto tranzistorů je řídicí napětí odděleno vrstvičkou izolantu. Tato vrstva je obvykle tvořená oxidem křemíku. Toto právě dává tranzistoru jeho skutečný název Metal-Oxide-Semiconductor, což znamená kov-oxi-polovodič.



Obr. 2 NMOS tranzistor a jeho napěťová struktura

V mém případě používáme tranzistory MOSFET s nevodivým kanálem. Jde o typ tranzistoru, kdy při napětí  $U_{GS}=0V$  je úplně zavřen, tj. že neprochází žádný proud. Jakmile začnem přivádět napětí na gate, začne tranzistorem protékat proud a napětí  $U_{DS}$  narůstá.

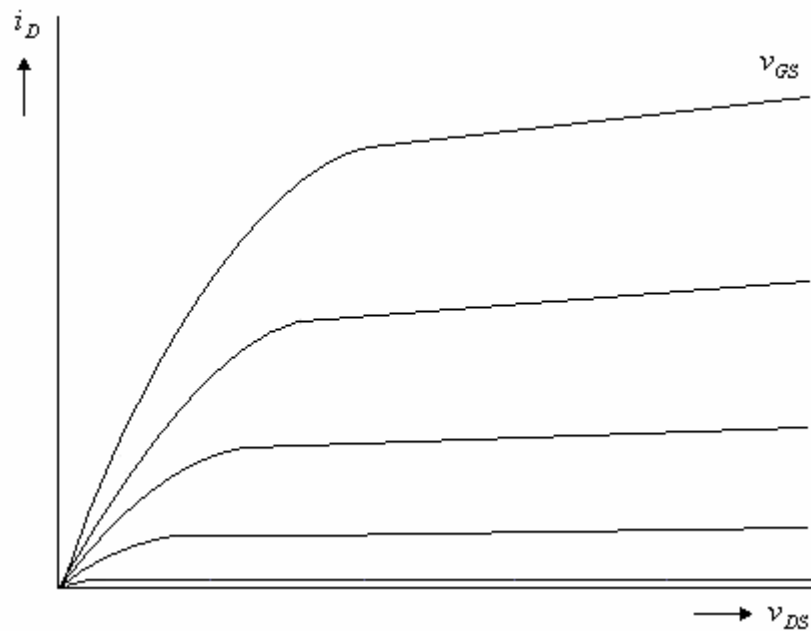
Ovšem toto napětí musí být větší jak  $V_T$  od kterého teprve začíná tranzistor pracovat. Proud drainu je tím vyšší, čím je větší je kladné napětí  $U_{GS}$  při stejném napětí  $U_{DS}$ . Toto platí u tranzistoru s vodivostním kanálem N. U MOSFETu s kanálem P je to podobné, pouze jsou zaměněny typy vodivosti jednotlivých oblastí. Budou pracovat tedy při záporném napětí mezi elektrodami drain a source.



Obr. 3 Převodní charakteristika tranzistoru NMOS

Musíme dále uvažovat, že vodivosti obou druhů jak NMOS tak PMOS jsou způsobeny dvěma různými nosiči nábojů. Jelikož vodivost NMOS je zprostředkována elektronami, tak díky tomuto tento tranzistor je 3x rychlejší než PMOS, kterému vodivost zaručují díry.

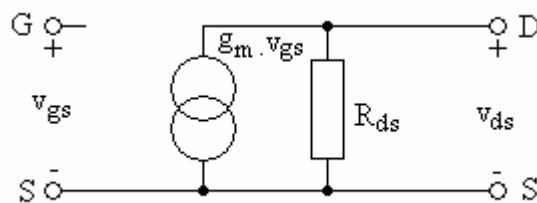
Na obr.3 je zobrazena soustava výstupních charakteristik tranzistoru NMOS. Parametrem je zde napětí  $V_{GS}$ . Pro PMOS vypadá výstupní charakteristika obdobně, ale musíme otočit znaménko napětí drain - source.



Obr. 4 Výstupní charakteristika tranzistoru NMOS

#### Výpočty velikostí tranzistorů a jeho parametry:

Abychom vypočítali parametry tranzistoru, potřebujeme znát jeho malosignálový model, který je na obr.5.



Obr. 5 Malosignálový model tranzistoru

V našem případě jsou nejdůležitější hodnoty tranzistoru pracující v saturačním režimu:

Výpočet proudu od kterého se odvíjejí ostatní vzorce je:

$$I_{DS} = K_N \cdot \left( \frac{W}{L} \right) \cdot (v_{GS} - v_T)^2$$

Výpočet transkonduktance:

$$g_m = 2K_N \cdot \left( \frac{W}{L} \right) \cdot (v_{GS} - v_T)$$

kde:  $g_m$  ..... transkonduktance tranzistoru  
 $W/L$  ..... velikost tranzistoru  
 $v_T$  ..... prahové napětí (někdy značeno  $V_{T0}$ )  
 $K_N$  ..... konstanta nosiče náboje pro danou technologii

$$g_{ds} = \lambda I_D$$

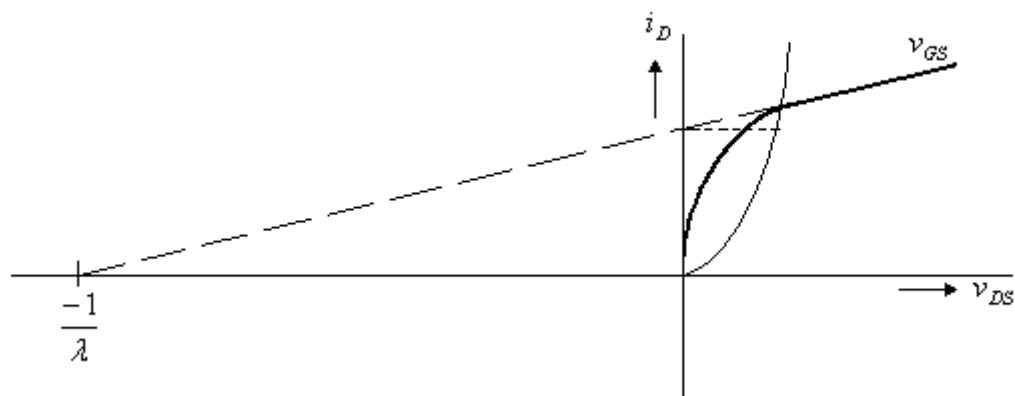
$g_{ds}$  ..... výstupní odpor tranzistoru  
 $\lambda$  ..... strmost  
 $I_D$  ..... velikost proudu z poudového zdroje

kde strmost je dána vztahem:

$$\lambda \cong \frac{10^7}{\sqrt{N_A} \cdot L}$$

strmost - úhel, který svírá ve výstupní charakteristice osu X s parametrem  $V_{GS}$ ,  
který je znázorněn na obr.6

- při větším  $L$  je strmost menší a tím dány lepší parametry tranzistoru
- $N_A$  .... koncentrace nosičů (děr nebo elektronů)



Obr. 6 Výstupní charakteristika a strmost

### 3 Technologie CMOS

Základním prvkem integrovaných obvodů vyráběných technologií CMOS (Complementary MOS) je sériová kombinace tranzistorů NMOS a PMOS, což jim také dalo název doplňkové (komplementární) obvody. Integrované obvody CMOS mohou být digitální i analogové.

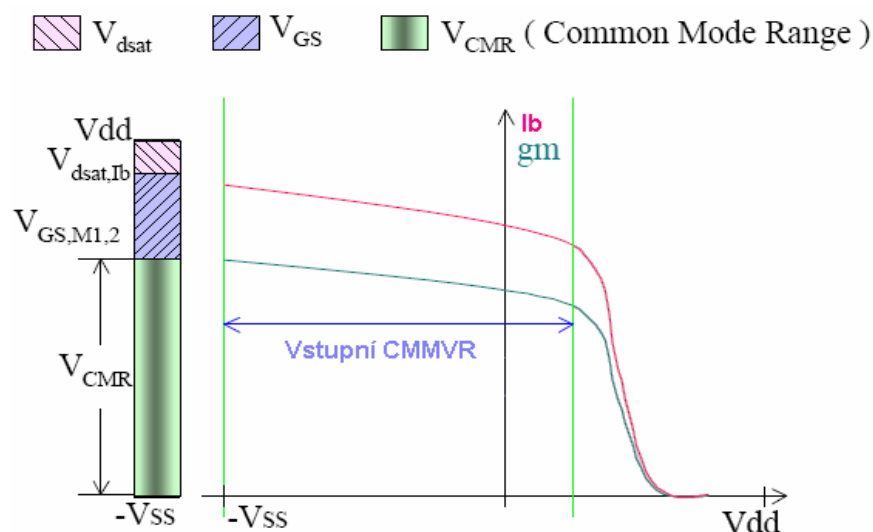
### Hlavní výhody spočívají:

- velmi malý příkon ve statickém režimu,
- velký rozsah napájecího napětí (3 až 15 V)
- velký rozsah pracovních teplot (-55 až +125°C),
- u digitálních obvodů velkou šumovou imunitu (která se zvětšuje s rostoucím napájecím napětím)
- možnost plné slučitelnosti s obvody TTL při napájení od 3,3 do 5,0V.

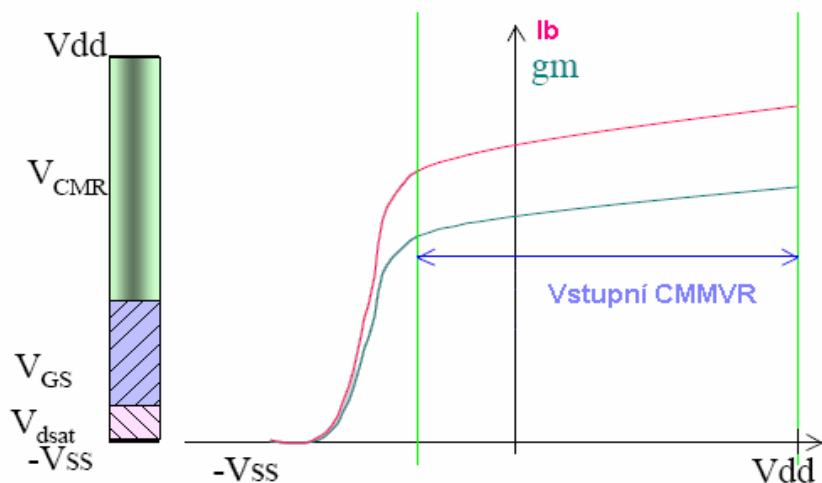
## 4 Rail-to-rail

Je to zapojení kde zesilovač využívá dvou diferenčních párů typů NMOS a PMOS, aby dobře pracoval a využíval napájecí napětí  $U_{DD}$  až  $U_{SS}$ .

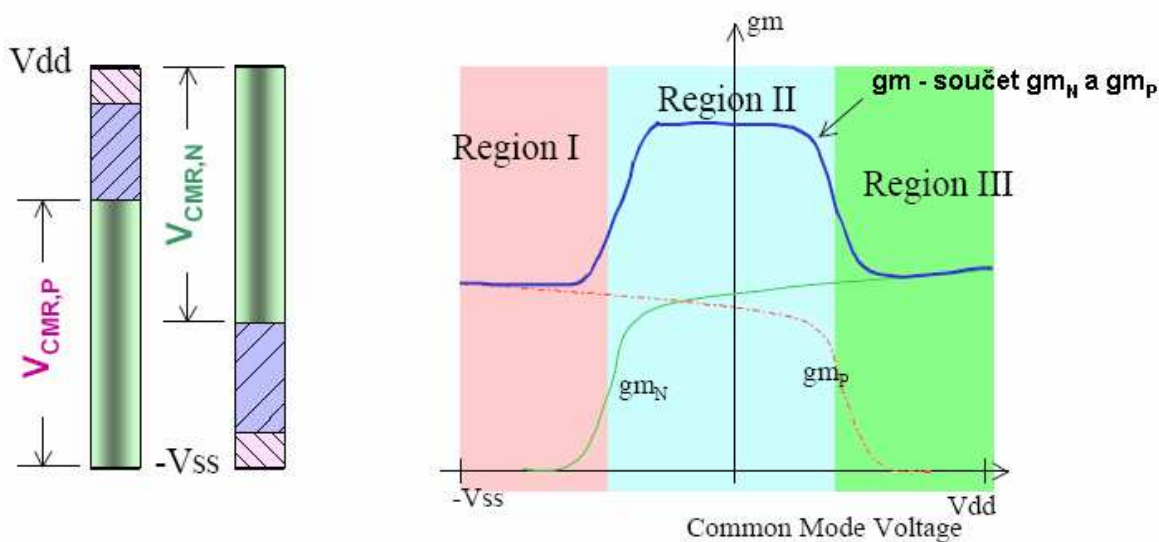
Z hlediska invertující konfigurace, rail-to-rail vstupní CMR (common mode range) není potřebný, ale pro neinvertující zapojení je vstupní CMV (common mode voltage) potřebný, zvláště u napěťového sledovače, který obvykle pracuje jako výstupní oddělovací zesilovač. CMR je zobrazen na obrázcích jak pro NMOS, PMOS tak je srovnán v režimu rail-to-rail.



Obr. 7 Vstupní diferenční pár P typu s pracujícím CMV



Obr. 8 Vstupní diferenční pár N typu s pracujícím CMV



Obr. 9 Vstupní diferenční páry P a N typu se sjednoceným CMV a transkonduktancí

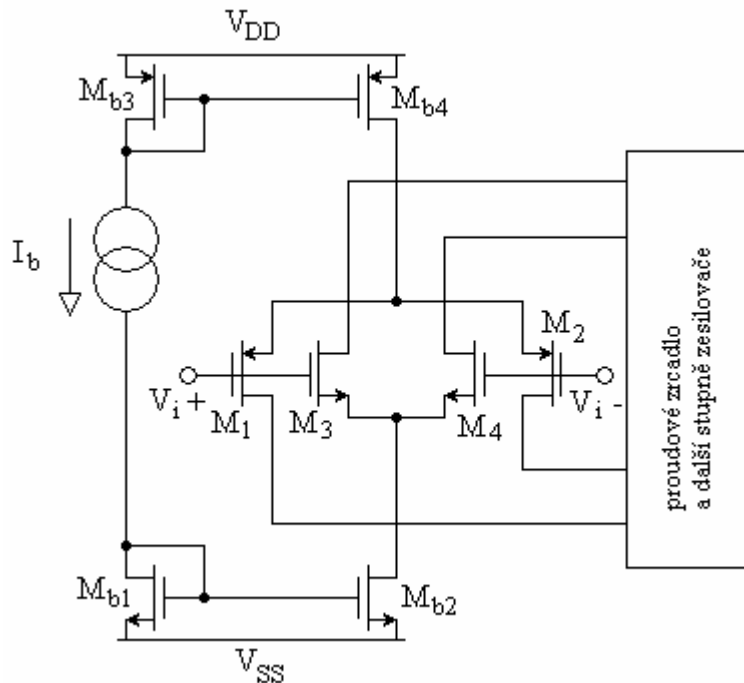
Popis obr. 8,9,10:

Region 1: jestliže je uzavřen záporný vstupní CMV, pracují pouze tranzistory s kanálem typu P. N kanál je zavřen, protože  $U_{GS}$  je menší jak  $U_T$ . Úplná transkonduktance diferenčního páru je tedy  $g_{mP}$

Region 2: Jestliže vstupní CMV se nachází ve střední oblasti, oba páry jak typu N tak typu P pracují. Úplná transkonduktance je dána jak je patrné z obr.10 součtem transkonduktancí  $g_{mP}$  a  $g_{mN}$

Region 3: jestliže je uzavřen kladný vstupní CMV, pracují pouze tranzistory s kanálem typu N. Úplná transkonduktance diferenčního páru je tedy  $g_{mN}$ .

Zapojení s tranzistory rail-to-rail je zobrazeno na obr.11, kde  $I_b$  je bias proud, dále pomocí tranzistorů  $M_{b1} - M_{b4}$  vytváříme proudový zdroj a tranzistory  $M_1 - M_4$  určují diferenční stupeň zesilovače.



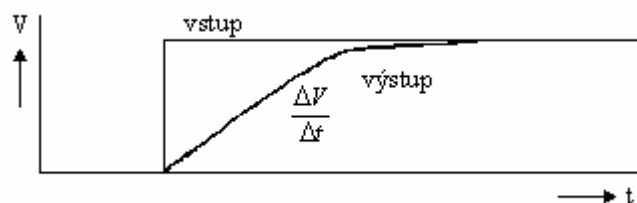
Obr. 10 Zapojení zesilovače rail-to-rail v prvním stupni

## 5 Korekční kapacitor

Kondenzátor  $C_k$  používáme ve druhém stupni zesilovače. Slouží nám k zamezení nežádoucího kmitání, což nám umožňuje frekvenční stabilitu. Velikost kapacity podle potřeby si volíme od 3 do 30 pF. Čím větší kapacita, tím víc se snižuje rychlost předběhu a tím se zhoršují vlastnosti zesilovače. I když nám pomáhá korekční kapacita při stabilitě zesilovače, tak při jejím zvětšování dochází k zúžení oblasti frekvenčního pásma.

Rychlost předběhu = slew rate:

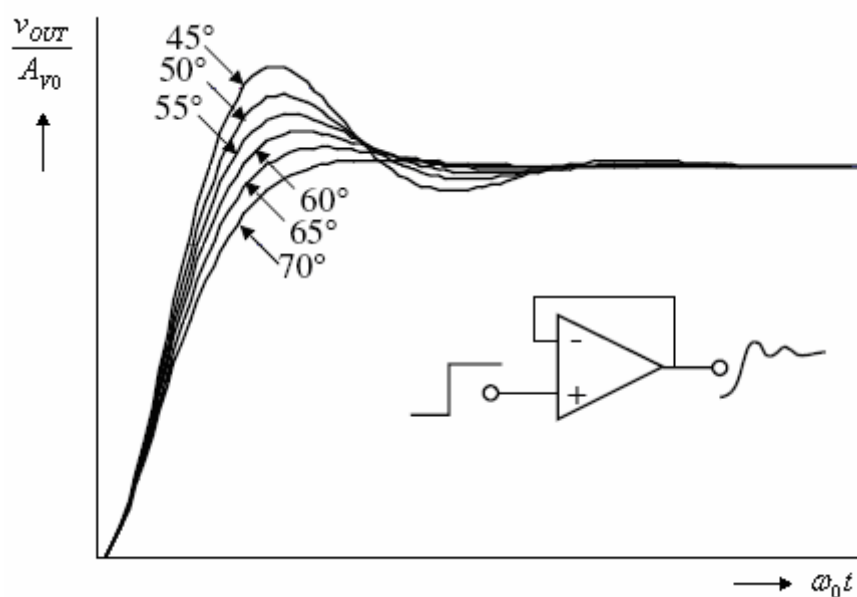
$$SR = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\Delta Q / C}{\Delta t} = \frac{I_B}{C_C}$$



Obr. 11 Rychlost předběhu

## 6 Frekvenční stabilita

Pro nastavení důležitých parametrů a zisků nám slouží druhý stupeň operačního zesilovače. Jeden z kroků mít dobrou stabilitu je rychleji dosáhnout požadované finální hodnoty. Fázová bezpečnost by měla být nejméně  $45^\circ$  a nejlépe, aby dosahovala hodnoty kolem  $60^\circ$  nebo větší. Znázornění fázové bezpečnosti je znázorněna na obr.13



Obr. 12 Stabilita operačního zesilovače

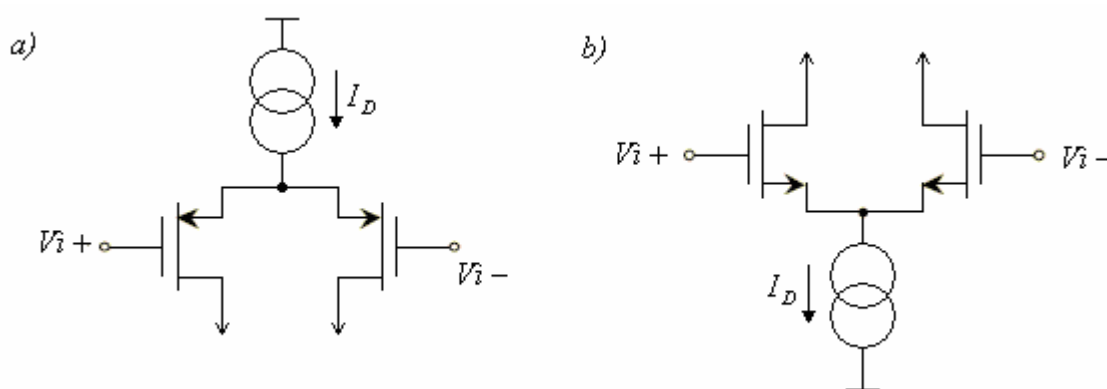
## 7 Jednotlivé bloky první části operačního zesilovače

### 7.1 Diferenční zesilovač

Diferenční zesilovač je v obvodech znázorněn jako dva tranzistory ve vstupní části, umístěné naproti sobě zrcadlově pootočené blízko u sebe, se spojenými emitory. Emitory mohou být zapojeny buď přímo, nebo přes malé rezistory. Většina praktických diferenčních



zesilovačů však obsahuje místo emitorového odporu zdroj konstantního proudu. Hlavním úkolem diferenčního zesilovače je sloučit dva vstupy operačního zesilovače do jediného signálu, který je pak postoupen dalším stupňům k dalšímu zesílení. Výstupní signál je odebrán z kolektoru pouze jednoho z obou tranzistorů. Tak se stane, že jeden ze vstupů je invertující a druhý neinvertující. Přesné zesílení obou vstupů a celého diferenčního stupně je vcelku nepodstatné, protože diferenční stupeň skutečně slouží hlavně k porovnání obou vstupů. O skutečné zesílení se můžou postarat následující stupně. Přesná velikost zesílení opět není podstatná, hlavně musí být co nejvyšší a o zbytek se postará zpětná vazba, takže v praxi bude na obou vstupech téměř stejné napětí a budou ponejvíce fungovat jako komparátor. Záporná zpětná vazba se bude snažit udržet je přesně v rovnováze.



Obr. 13 Diferenční pár a) PMOS, b) NMOS

Proud  $I_D$  je ve skutečnosti tranzistor s vodivým kanálem typu P u PMOS diferenčního stupně a N u NMOS diferenčního stupně.

Pro velikost proudu použijeme vzorec (pro PMOS):

$$I_D = \frac{K_p \cdot W}{2 \cdot L} (v_{GS} - v_{T0})^2 \cdot (1 + \lambda v_{DS})$$

## 7.2 Proudová zrcadla

V zapojení proudových zrcadel se referenční proud tekoucí v jedné větvi reprodukuje v jeho druhé větvi. Je to významný stavební prvek v analogové technice.

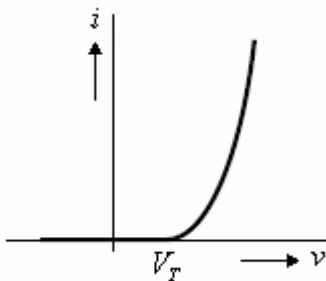
Proudová zrcadla slouží jako proudové opakovací, zdroje konstantního proudu nebo jako vysokoohmový rezistor. Proudový zdroj má funkci tzv. aktivní zátěže, protože se využívá jeho velký výstupní odpor. Výhoda oproti vysokoohmovým rezistorům je, že zaujímají menší plochu na čipu a vykazují menší parazitní kapacity.

### 7.2.1 MOS tranzistor jako dioda

Když má MOS tranzistor spojený gate s drainem, pak pracuje jako dioda s charakteristikou podobnou diodě s PN přechodem která je vyznačena na obr.19



Obr.14 Zapojení tranzistoru jako diody



Obr. 15 Převodní charakteristika tranzistoru v diodovém zapojení

Rozbor napětí v případě MOS tranzistoru v diodovém zapojení:

$$v_{DS} \geq v_{GS} - v_T$$

$$v_D - v_S \geq v_G - v_S - v_T$$

$$v_D - v_G \geq -v_T$$

$$v_{DG} \geq -v_T$$

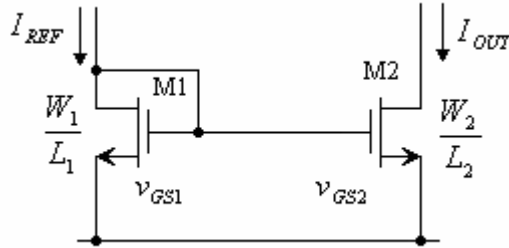
Toto zapojení se nejvíce využívá v proudovém zrcadle a pro vytvoření proudového zdroje. V náhradním lineárním zapojení se tato součástka vyznačuje odporem  $R$ , kterým protéká proud  $I$ .

### 7.2.2 Jednoduché proudové zrcadlo

Toto proudové zrcadlo je složeno pouze ze dvou tranzistorů stejného typu. Zapojení tohoto zrcadla je na obr. X. Tranzistor M1 je zapojen v diodovém zapojení a pomocí napětí  $V_{GS1}$  je určen pracovní bod tranzistoru M2. Podle rovnice lze stanovit, že pokud tranzistory M1 a M2 budou shodné, pak i referenční a výstupní proud bude shodný.

$$I_{REF} = \frac{\mu C_{OX}}{2} \left( \frac{W}{L} \right)_1 (v_{GS1} - v_T)^2 (1 + \lambda v_{DS1})$$

$$I_{OUT} = \frac{\mu C_{OX}}{2} \left( \frac{W}{L} \right)_2 (v_{GS1} - v_T)^2 (1 + \lambda v_{DS2})$$



Obr. 16 Jednoduché proudové zrcadlo

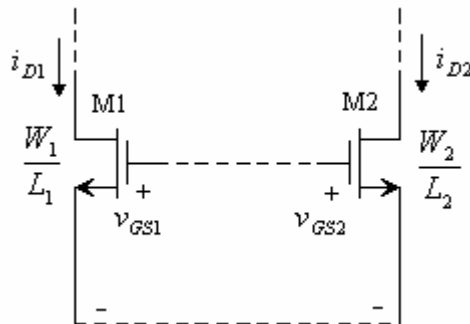
Toto zapojení lze využít jen pro některé aplikace. Nejvíce se využívají při nízkonapěťových aplikacích, kde se využívá jeho velký dynamický rozsah.

### 7.2.3 Cascode current mirror – Kaskodové proudové zrcadlo

Části kaskodového proudového zrcadla:

Máme dva tranzistory, které jsou spojeny navzájem gatem jak je na obr.14

Jestliže je napětí gate-source shodné, velikost tranzistorů taktéž a oba tranzistory pracují v saturačním režimu, pak proudy v tomto případě se budou rovnat. Ovlivnění proudu může být pouze parametrem W/L.



Obr. 17 Zapojení se společným gatem

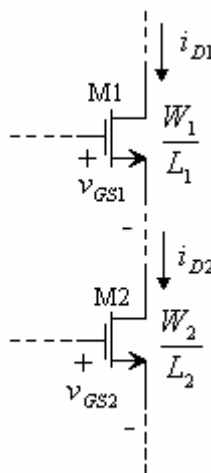
$$i_{D1} = \frac{K \cdot W_1}{2 \cdot L_1} (v_{GS1} - v_{T1})^2 \rightarrow (v_{GS1} - v_{T1})^2 = \frac{2K i_{D1}}{(W_1/L_1)}$$

$$i_{D2} = \frac{K \cdot W_2}{2 \cdot L_2} (v_{GS2} - v_{T2})^2 \rightarrow (v_{GS2} - v_{T2})^2 = \frac{2K \cdot i_{D2}}{(W_2/L_2)}$$

Jestliže pak  $v_{GS1} = v_{GS2}$  pak můžeme rovnou psát

$$\frac{W_2}{L_2} \cdot i_{D1} = \frac{W_1}{L_1} \cdot i_{D2} \quad \text{nebo} \quad i_{D1} = \frac{W_1/L_1}{W_2/L_2} \cdot i_{D2}$$

Druhá možnost je, že drainový proud dvou tranzistorů je takřka stejný. Dále oba tranzistory jsou stejné a pracují v saturačním režimu, pak napětí gate-source je závislé na W/L. Tento případ nám znázorňuje obr.15

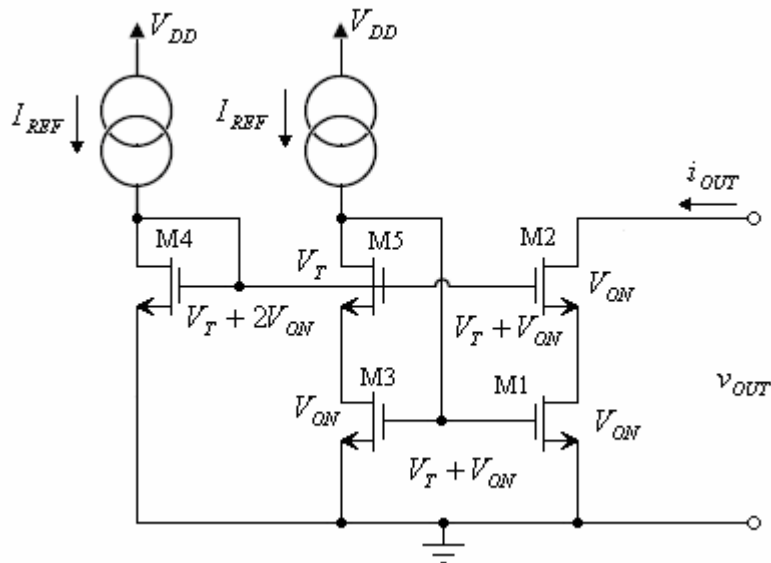


Obr. 18 Zapojení darin a source

Jestliže proudy  $i_{D1}$ ,  $i_{D2}$  jsou stejné pak můžeme psát:

$$v_{GS1} = v_{T1} + \sqrt{\frac{W_2/L_2}{W_1/L_1}} (v_{GS2} - v_{T2})^2$$

Pro kaskodové proudové zrcadlo, které je zobrazeno na obr.16 lze určit napětí jednotlivých tranzistorů z předchozích obrázků (obr. 14, obr. 15) a jejich rovnic.

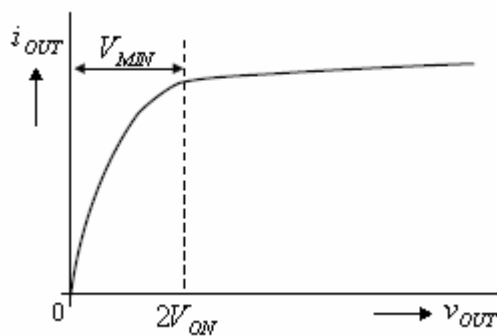


Obr. 19 Kaskodové proudové zrcadlo

Aby byl maximálně využit výstup tohoto stupně, spočítáme velikost každého tranzistoru takto:

pro napětí  $V_{MIN}$  je součet dvou tranzistorů M1 a M2 v saturaci. Což znamená:

$$V_{MIN} = 2V_{ON} = 2V_{DS(SAT)}$$



Obr. 20 Graf znázorňující velikost minimálního výstupního napětí

Z předchozích dvou částí (tranzistory spojeny navzájem gatem a source s drainem), můžeme určit že velikosti  $W/L$  u tranzistorů M1, M2, M3, M5 budou stejné.

$$V_{ON} = \sqrt{\frac{2I_{REF}}{K \cdot (W/L)}} \quad \text{pak} \quad \frac{W_1}{L_1} = \frac{W_2}{L_2} = \frac{W_3}{L_3} = \frac{W_5}{L_5} = \frac{2I_{REF}}{K \cdot V_{ON}^2} = \frac{8I_{REF}}{K \cdot V_{MIN}^2}$$

Pro M4 je napětí na tranzistoru součtem napětí M1 -  $V_{ON}$  a M2 -  $V_{GS}$

potom můžeme říci, že  $V_{M4} = V_T + 2V_{ON}$

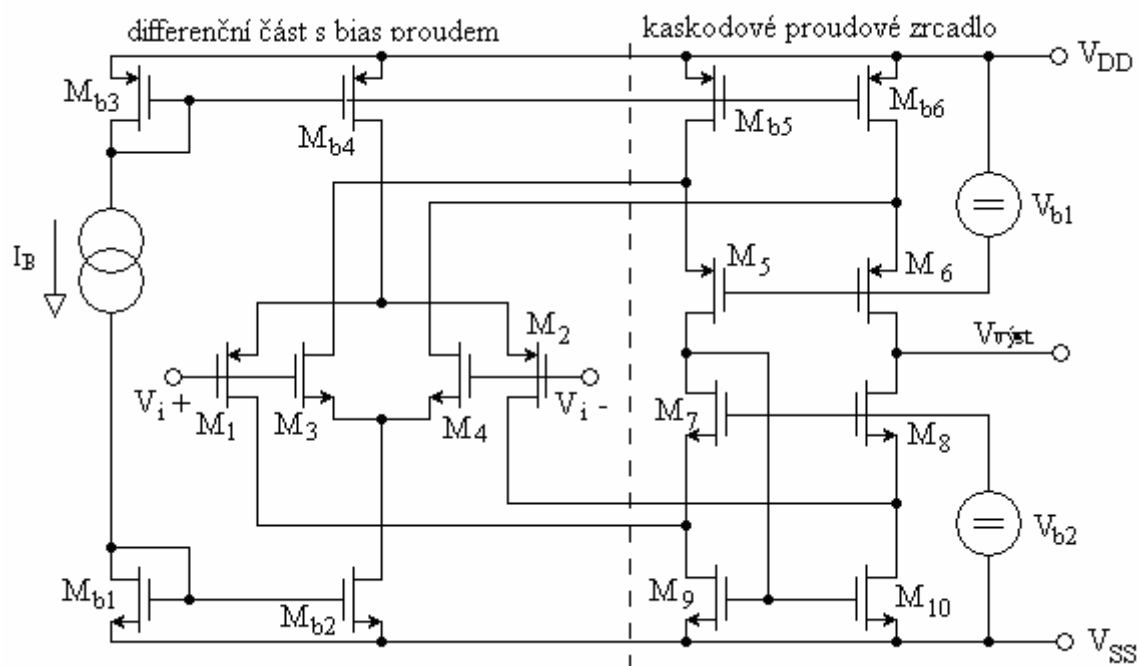
velikost tranzistoru M4 je potom dána:

$$\frac{W_4}{L_4} = \frac{2.I_{REF}}{K.(v_{GS4} - v_T)^2} = \frac{2.I_{REF}}{K.(2V_{ON})^2} = \frac{I_{REF}}{2K.V_{ON}^2}$$

Při výpočtu dojdeme k závěru že tranzistor M4 je 4x menší jak tranzistory M1, M2, M3, M5.

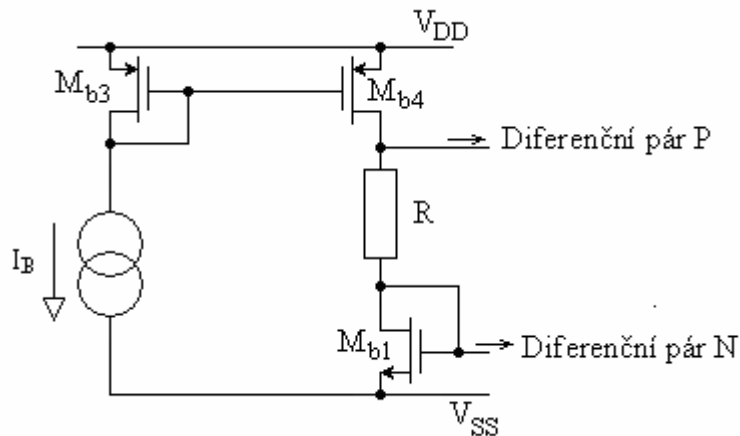
### 7.3 Zapojení 1. stupně zesilovače rail-to-rail

Zapojení se skládá z dvou diferenčních párů PMOS (tranzistory M<sub>1</sub> a M<sub>2</sub>) a NMOS (tranzistory M<sub>3</sub> a M<sub>4</sub>). Do těchto tranzistorů je přiváděn proud díky jednoduchým proudovým zrcadlům M<sub>b1</sub> až M<sub>b4</sub>. Tranzistory M<sub>b5</sub> a M<sub>b6</sub> jsou taktěž proudovými zdroji, ale ke kaskodovému proudovému zrcadlu. Díky velikosti proudu, který přenáší, se volí ostatní velikosti tranzistorů tohoto zrcadla, který tvoří tranzistory M<sub>5</sub> až M<sub>10</sub>.



Obr. 21 Rail-to-rail první stupeň operačního zesilovače

Jelikož nemůžeme v obvodu používat napěťové a proudové zdroje, tak použijeme zapojení pro proudový zdroj obr. 22 pomocí kterého napájíme diferenční páry a dělič napětí obr. 23 pro tranzistory v kaskodovém proudovém zrcadle, aby pracovaly v saturačním režimu.



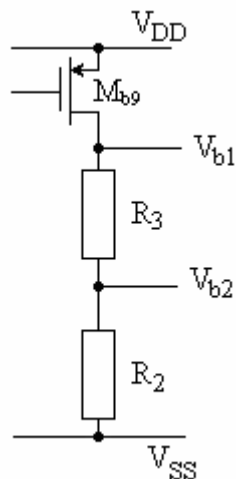
Obr. 22 Přívod  $I_B$  jako referenční zdroj proudu

Pro výpočet velikosti tranzistorů  $M_{b1}$  až  $M_{b4}$  použili jsme vzorec  $I_D = \frac{K_P \cdot W}{2 \cdot L} (v_{GS} - v_{T0})^2$

ze kterého jsme si odvodili  $\frac{W}{L}$ .  $I_D$  je velikost proudu, kterou chceme aby tekla tranzistory.

Jako proud  $I_D$  jsme si zvolili  $5\mu A$ , tudíž velikost  $M_{b1}, M_{b2} = 2,63$  a  $M_{b3}, M_{b4} = 8,33$

Odpor  $R$  byl stanoven na  $500k\Omega$ .



Obr. 23 Dělič napětí

Aby tranzistory v kaskodovém proudovém zrcadle, které jsou buzeny napěťovými zdroji, pracovali v saturačním režimu, musí být velikost napětí zhruba  $V_{b1} = 3,4V$  a  $V_{b2} = 1,4V$ .

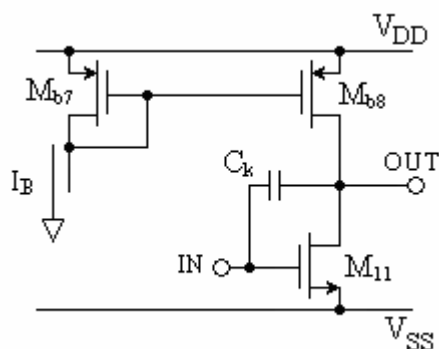
Proud větví jsme stanovili na  $20\mu A$ , tudíž velikost tranzistoru  $M_{b9} = 33,3$

Z ohmova zákona jsme dopočítali velikost rezistorů  $R_2 = 100k\Omega$  a  $R_3 = 70k\Omega$ .

---

## 7.4 Zapojení 2. stupně zesilovače

Jako zapojení nám slouží invertor s aktivní zátěží. Jako vstupní tranzistor můžeme použít jak NMOS (v našem případě) nebo PMOS, kterému vytvářejí referenční napětí tranzistory typu N.



Obr. 24 Druhý zesilovací blok operačního zesilovače

Jelikož potřebujeme mít výstupní proud  $\pm 300\mu\text{A}$ , pak si potřebujeme nastavit dostatečný proud, který touto větví poteče, proto jsem zvolil, že tranzistorem  $M_{b8}$  bude protíkat proud  $600\mu\text{A}$ . Velikost tranzistoru  $M_{b8} = 500$  a  $M_{11} = 1580$ .



---

## 8 Závěr

V tomto projektu jsme se seznámili především s tranzistory MOS a jejich charakteristikami a rozebrali některá zapojení s těmito tranzistory pro zesilovač rail-to-rail. Pomocí teorie jsme navrhly všechny bloky pro sestavení zesilovače rail-to-rail včetně výpočtů pro tranzistory MOS. Dále jsme byly seznámeny s programem CADENCE, ve kterém jsme prováděly veškeré zapojení zesilovače a pro kontrolu odsimulovaly některé charakteristiky.

Některé obrázky a grafy byly převzaty z uvedené literatury.

Zapojení kompletního zesilovače včetně parametrů součástek jsou uvedeny v příloze.

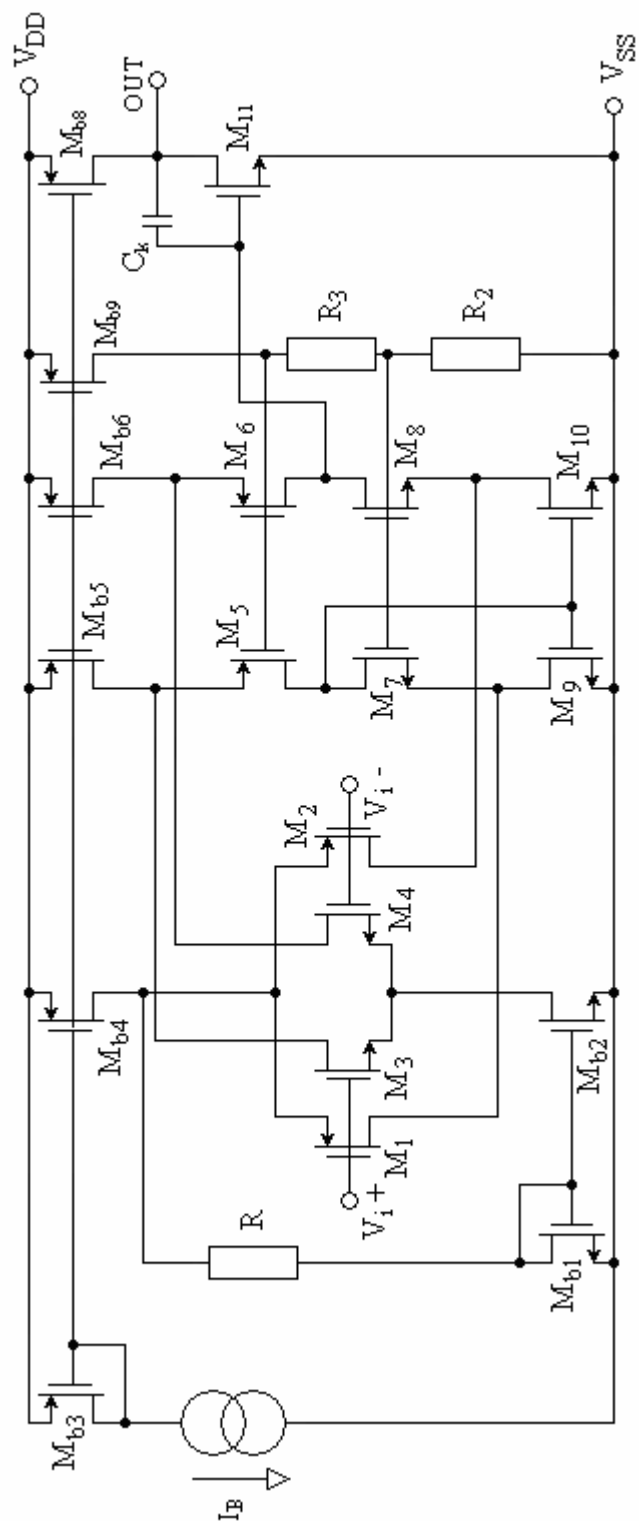
---

## 9 Použitá literatura

- [1] M. Frohn; W. Oberthür; H.-J. Fiedler. Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení. Technická literatura BEN, Praha 2006. ISBN 80-7300-123-3
- [2] Punčochář Josef. Operační zesilovače v elektronice. 4.doplněné vydání, Praha 1999. ISBN 80-86056-37-6
- [3] Short courses and Educational Recourses by Phillip E. Allen:  
<http://www.aicdesign.org>

## 10 Příloha

### Příloha č.1 Kompletní zapojení zesilovače rail-to-rail



Příloha č.2 Tabulky s parametry součástek

Součástka	Velikost tranzistoru(W/L)	Součástka	Velikost tranzistoru(W/L)
M <sub>b1</sub>	5,26/2	M <sub>3</sub>	16,6/4
M <sub>b2</sub>	5,26/2	M <sub>4</sub>	16,6/4
M <sub>b3</sub>	16,66/2	M <sub>5</sub>	25/2
M <sub>b4</sub>	16,66/2	M <sub>6</sub>	25/2
M <sub>b5</sub>	50/4	M <sub>7</sub>	7,9/2
M <sub>b6</sub>	50/4	M <sub>8</sub>	7,9/2
M <sub>b8</sub>	1000/2	M <sub>9</sub>	7,9/2
M <sub>b9</sub>	66,6/2	M <sub>10</sub>	7,9/2
M <sub>1</sub>	52,6/4	M <sub>11</sub>	3160/2
M <sub>2</sub>	52,6/4		

R	500k $\Omega$
R <sub>2</sub>	70k $\Omega$
R <sub>3</sub>	100k $\Omega$
C <sub>k</sub>	10pF